

· 理论 ·

## 基于非线性有限元的瓦楞纸板动态冲击响应的仿真研究

高德<sup>1</sup>, 董静<sup>1</sup>, 李军<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨商业大学, 哈尔滨 150028; 2. 佳木斯大学, 佳木斯 154007)

**摘要:** 应用 ABAQUS 有限元分析软件, 针对 AB 型瓦楞纸板在动态冲击下的缓冲性能, 进行非线性有限元仿真分析, 得到表征瓦楞纸板缓冲性能的加速度曲线, 并与动态跌落实验测试得到的曲线进行比较, 结果验证了 ABAQUS 有限元仿真的有效性, 为瓦楞纸板缓冲性能的研究提供了新方法。

**关键词:** 瓦楞纸板; ABAQUS; 动态冲击; 有限元

**中图分类号:** TB484.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2006)04-0010-02

### Research on Simulation of Dynamic Response of Corrugated Board with Nonlinear Finite Element

GAO De<sup>1</sup>, DONG Jing<sup>1</sup>, LI Jun<sup>2</sup>

(1. Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

2. Jiamusi University, Jiamusi 154007, China)

**Abstract:** The buffering behavior of AB corrugated board under dynamic impulsion was analyzed using ABAQUS finite element analysis software. Acceleration curve that can reflect buffering behavior of corrugated board was plotted by the simulation models. The curve was then compared with analogous experimental measurement performed using actual corrugated board specimen. The comparative results validated the availability of finite element simulations. It provided a new way to research the buffering behavior of corrugated board.

**Key words:** corrugated board; ABAQUS; dynamic impulsion; FEA

瓦楞纸板作为应用广泛的缓冲包装材料, 其缓冲性能的研究一直为包装动力学的研究者和包装结构的设计者所关注, 而材料缓冲性能的“动态”数据描述往往比“静态”数据描述更为切合实际, 国内外许多学者<sup>[1-3]</sup>对于瓦楞纸板的动态特性做了不少研究, 并取得了重要进展。加速度是表征流通过程中冲击或振动负荷的基本参数之一, 包装件在冲击载荷下的最大加速度是反映瓦楞纸板缓冲性能的重要指标之一<sup>[4]</sup>。目前对于最大加速度数据大多数通过跌落冲击实验测试获取, 但是实验本身有一定的局限性, 而且费时费力又浪费资源。

本文尝试应用国际通用的有限元软件 ABAQUS 模拟 AB 型瓦楞纸板材料在动态冲击下的响应特性, 绘制出典型的加速度-时间曲线, 并与跌落试验测试得到的相应曲线进行比较, 结果表明, 大型通用的非线性有限元程序 ABAQUS 在瓦楞纸板实体结构性能研究中, 具有较强的功能, 能够满足瓦楞纸板动态仿真分析, 为 ABAQUS 在瓦楞纸板性能研究中的应用提供了依据。

## 1 瓦楞纸板的非线性有限元模型

在模型中, 瓦楞纸板材料的几何非线性和材料非线性都被融合到求解过程, 从而使有限元模型更为符合实际试样。其中, 面纸和芯纸都采用非线性弹塑性模型来描述它的应力应变关系。该曲线由模型  $\sigma = a_1 \varepsilon + a_2 \sin(a_3 \varepsilon) + a_4 \lg(a_5 \varepsilon)$  根据实验测试数据进行参数拟合得到。拟合的参数见表 1。

表 1 模型参数

Tab. 1 model parameters

$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
1.08123	0.09504	-6.74907	2.7558e-7	1.4341e-7

在 ABAQUS 中定义弹塑性材料时, 须将材料的非线性应力应变关系分为线弹性部分和非线性塑性部分。对于弹性部

收稿日期: 2006-06-19

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(A0302)

作者简介: 高德(1963-), 男, 哈尔滨商业大学教授, 主要研究方向为包装动力学。

分,其各向同性线弹性材料特性见表2。

表2 线弹性材料参数

Tab. 2 Linear elastic material parameters

特 性	面纸	芯纸
弹性模量/ MPa	7600	3600
泊松比	0.3	0.3

而对于非线性塑性部分应用文献[7]中提供的公式将材料实验数据从名义应力应变的值转变为真实应力应变的值。本文中,面纸和芯纸的粘和使用的是多点约束法,即在面纸和芯纸间施加多点约束,让面纸和芯纸连接处的节点具有相同的平移和旋转运动,实现粘和<sup>[5]</sup>。有限单元选取 ABAQUS 单元库里的线性四节点四边形的壳单元(S4R),单元网格大小为2mm。图1为AB型瓦楞纸板的有限元模型网格图。

## 2 动态冲击试验仿真

本文模拟质量为1kg的钢板在AB型瓦楞纸板封装下从40cm的高度下落的动态响应。将AB型瓦楞纸板置于可视为刚体的上部钢板和下部圆盘之间。上部钢板质量为1kg,下部圆盘模拟为地面,见图2。

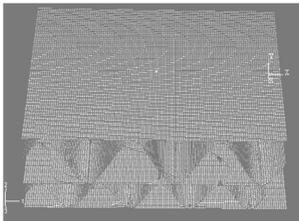


图1 AB型瓦楞纸板有限元网格图  
Fig. 1 AB-flute corrugated board mesh

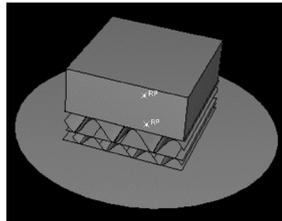


图2 仿真模型  
Fig. 2 Simulation model

在分析中,如果让ABAQUS/Explicit计算在重力影响下的运动,那么为了完成“自由落体”部件的模拟需要大量的时间增量,其计算成本太高而且容易出错<sup>[6]</sup>,文中使用的方法是模拟钢板和瓦楞纸板在一个十分接近于地面的初始位置,指定一个 $2.828(m \cdot s^{-1})$ 的初始速度来模拟从40cm高处的下落,也就是在上部钢板和瓦楞纸板上有 $2.828(m \cdot s^{-1})$ 向下的冲击速度。模型的边界条件为:上部钢板除2个方向平移自由度外,其他自由度都固定;底部圆盘所有自由度被固定;瓦楞纸板除2个方向平移自由度外,其他自由度都固定。

冲击过程中,刚体与瓦楞纸板单元的接触问题是一类非线性问题,选用动态的显式积分算法(Dynamic/Explicit)<sup>[7]</sup>来进行计算。以上面钢板与瓦楞纸外面纸2个外侧面为一接触对,其中钢板下表面为主接触面,外面纸外侧面为从接触面,同理,以下面圆盘与瓦楞内面纸的外侧面为一接触对,其中圆盘的上

表面为主接触面,内面纸的外侧面为从接触面,并且把刚体表面与瓦楞纸板单元的外侧面都视作光滑,两者接触没有摩擦。除了要设置上下刚体与瓦楞纸板结构的接触外,还要设置纸板内部每个单元内侧表面自身的接触,将每个单元的整个内侧表面设为一个接触面,将接触关系设为自接触,选择罚函数作为摩擦公式,指定摩擦系数为0.3,这样分别将每个单元的自接触设置好。

冲击过程中,瓦楞纸板的各个壳单元使用减缩积分和沙漏控制,减缩积分保证存储单元计算得到最佳精度,同时增加伪刚度避免了沙漏控制过程中过度变形引起的不正确解<sup>[8]</sup>。

经过ABAQUS6.5程序的计算,选取上部钢板上表面中心为参考点,考察此参考点2方向上的加速度 $A_z(m \cdot s^{-2})$ ,可得到最大加速度-时间曲线见图3,并得到跌落高度为40cm时,其最大加速度 $A_{max} = 1156.55(m \cdot s^{-2}) = 117.895g$ 。

## 3 仿真结果比较分析

AB型瓦楞纸板在40cm跌落高度下的动态压缩实验所测数据绘制的加速度-时间曲线见图4,其最大加速度值 $a = 1147.93(m \cdot s^{-2}) = 117.016g$ 。

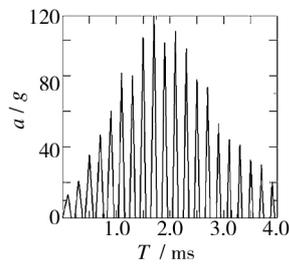


图3 仿真最大加速度-时间曲线  
Fig. 3 Acceleration-time curve of simulation model

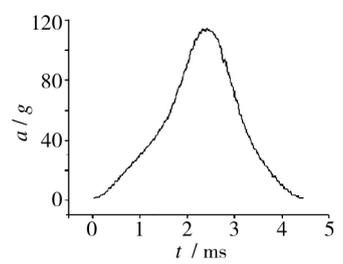


图4 实测最大加速度-时间曲线  
Fig. 4 Acceleration-time curve of experimental testing

由图3和图4比较得知:ABAQUS仿真结果和实验所测结果十分吻合,其冲击波形都类似于正弦波形,总的冲击加速度趋势一致,而且最大加速度值都在 $1200(m \cdot s^{-2})$ 左右,冲击时间都为4ms左右,其误差在允许范围之内。但是ABAQUS仿真得到的最大加速度 $1156.55(m \cdot s^{-2})$ 明显大于实际瓦楞纸板跌落实验所测值 $1147.93(m \cdot s^{-2})$ ,说明仿真模型的缓冲性能不如实际瓦楞纸板,分析其原因在于:实际瓦楞纸外面纸和芯纸的粘和使用了胶粘剂,胶粘剂本身具有一定的缓冲性能,而仿真模型中没有考虑胶粘剂对冲击性能的影响,这也与实际相符合。

## 4 结 语

瓦楞纸板的非线性有限元模型建立并应用于动态冲击试  
(下转第25页)

2) 应力时间规律。在上一节的图示和表 2 中,已经提交了啤酒瓶在 2 种工况、2 种状态下跌落冲击的最大 *mises* 应力和发生部位,图 6、图 7 选用的 4 幅应力-时间曲线图,揭示了啤酒瓶跌落冲击时典型部位应力随时间变化的下列特征:

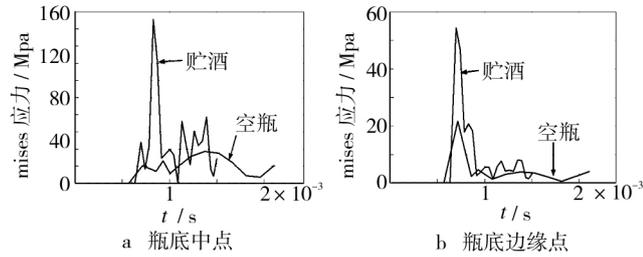


图 6 平跌落时两典型位置的应力-时间曲线

Fig. 6 The stress-time curve of two typical position when vertically dropping

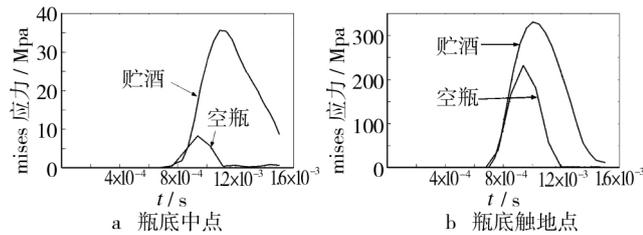


图 7 斜跌落时两典型位置的应力-时间曲线

Fig. 7 The stress-time curve of two typical position when tilted dropping

(1) 跌落触地瞬时,贮酒瓶中液体还在向下运动,瓶底所受地面反力与液体向下的冲击力会有短暂的平衡时段,反映在曲线上,贮酒时的应力变化在时间上比空瓶时有所滞后(约 0.00005s)。

(2) 冲击时内装液体对容器应力的提升在不同部位有很大差异,即本文引入的“液致应力倍增系数”随位置而变化。

平跌落时瓶底中点应力幅值提升 124Mpa,为空瓶时该点应力幅值的 6.20 倍;瓶底触地点应力提升 34Mpa,为空瓶时该点应力幅值的 1.62 倍;斜跌落时瓶底中点应力幅值提升 27Mpa,为空瓶时瓶底中点应力幅值的 3.38 倍;瓶底触地点应力幅值提升 97Mpa,为空瓶时该点应力幅值的 0.45 倍,可见瓶内贮液对瓶底中点的影响明显大于对触地点的影响。

## 6 结语

学习和研究过程中,作者既体会到前人关于易损度、损坏边界等理论对包装动力学发展的贡献;同时又困惑如何使其在包装结构的优化设计指导中发挥更明确的作用?联想到众多工程领域中广为采用的有限元应力分析和结构设计方法的进展,在本文中运用已趋成熟的 ANSYS 软件,设计了有效的计算流程,仿真计算啤酒空瓶和贮酒状态的跌落冲击应力,得到了啤酒瓶在典型跌落工况下的应力场及其时间-应力曲线。论文中首次定义了量化描述液体在冲击运动中对容器应力倍增作用的系数  $\alpha$ ,揭示了液态商品对容器应力影响的若干规律。同时也认识到,这方面尚有许多现象有待解释,如“流固耦合”与本问题的联系,又如容器的原始缺陷对冲击防护能力的具体影响等,需要进行深入的探讨。

## 参考文献:

[1] 奚德昌,陈庆华,王振林,等. 包装结构设计[M]. 杭州:浙江大学出版社,1994.  
 [2] 彭国勋,王瑞栋,等. 缓冲包装动力学[M]. 长沙:湖南大学出版社,1989.  
 [3] 刘功,康勇刚,等. 包装测试[M]. 北京:中国轻工业出版社,1994.  
 [4] 刘涛,杨凤鹏. 精通 ANSYS[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

(上接第 11 页)

验模型中首次考虑了瓦楞纸板的几何(大变形)和材料(塑性部分)非线性,使模型更为贴近实际。比较仿真结果表明此模型与真实瓦楞纸板测试数据吻合,验证了使用 ABAQUS 有限元软件分析瓦楞纸板性能方法的有效性。将来研究应将用于粘和瓦楞面纸和芯纸的胶粘剂,对于瓦楞纸板性能的影响考虑到模型中,以建立更为精确的有限元模型,从而代替实验测试,为缓冲包装设计提供依据。

## 参考文献:

[1] GAO De, XI De-chang. Dynamic Modeling of the Corrugated Board and Parameter Identification[C]// 11 th IAPRI World Conference on Packaging. 1999.  
 [2] 高德,王振林,陈乃力. B 楞双层瓦楞纸板衬垫平压缓冲动态性能建模[J]. 振动工程学报,2001,14(2).

[3] 高德,胡洪志,奚德昌. 瓦楞纸板的动态压缩性能建模及应用[J]. 非线性动力学学报,1998.  
 [4] 奚德昌,等. 包装动力学中的若干问题[J]. 包装工程,1990,20(3).  
 [5] 付云岗. 双瓦楞纸板振动传递特性研究[D]. 西安:西安理工大学,2005.  
 [6] 庄茁,张帆,等. ABAQUS 非线性有限元分析与实例[M]. 北京:科学出版社,2005.  
 [7] ABAQUS/Explicit 有限元入门指南[M]. 庄茁,等译. 北京:清华大学出版社,1998.  
 [8] GILCHRIST A C, SUHLING J C, URBANIC T J. Nonlinear Finite Element Modeling of Corrugated board[J]. Mechanics of Cellulosic Materials, 1999. (余不详)  
 [9] NORDSTRAND Tomas. Analysis and Testing of Corrugated Board Panels into the Post-buckling Regime[J]. Composite Structures, 2004,63(2).